

ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ И АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССА ОГНЕВОГО РАФИНИРОВАНИЯ МЕДИ

Аннотация

В данной работе рассмотрены вопросы оптимизации и автоматизации окислительной стадии процесса огневого рафинирования черновой меди. Показан принцип определения оптимальных параметров окисления, основанный на использовании элементов математического моделирования и математической статистики. Значительное внимание уделено автоматизации процесса.

Ключевые слова: огневое рафинирование, параметры окисления, черновая медь, моделирование, автоматизация.

Abstract

In this work questions of optimization and automation of an oxidizing stage of process of fire refinement of black copper are considered. The principle of determination of optimum parameters of oxidation based on use of elements of mathematical modeling and mathematical statistics is shown. Considerable attention is spared to process automation.

Key words: fire refinement, oxidation parameters, black copper, modeling, automation.

Введение

В настоящее время медь является безальтернативным материалом во многих высокотехнологических отраслях промышленности, таких как вычислительная техника, электроника, электротехника, автоматика, приборостроение, радио- и телекоммуникационное производство и многих других. Выбор меди основан на ее основных свойствах (ковкость, тягучесть, коррозионная устойчивость, высокая тепловая и электрическая проводимость).

В настоящее время более 85 % меди в мире производится пирометаллургическим способом, заключительным этапом которого является огневое рафинирование черновой меди, а затем ее электролиз.

В черновой меди, загрязненной примесями, резко снижены механические и в особенности электротехнические свойства, поэтому ее подвергают огневому рафинированию, а затем электролизу.

Процессы огневого рафинирования

Огневое рафинирование проводится в отражательных рафинировочных печах, разогрев которых осуществляется за счет сжигания нефти, угольной пыли или природного газа при температурах от 1100 до 1200 °С.

Операциями огневого рафинирования являются:

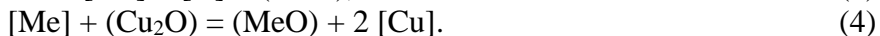
- загрузка шихты (2–2,5 час.);
- плавление (5–11 час.);
- окисление (2–7 час.);
- дразнение на «плотность» и «мягкость» (2–3,5 час.);
- разлив меди (4–6 час.) [1–5].

Продолжительность стадий может изменяться в зависимости от загрязненности черновой меди, емкости рафинировочной печи и производительности механического оборудования.

Рафинирование меди основано на следующих ее свойствах:

- растворимости Cu_2O (до 12 %) в жидкой меди;
- способности Cu_2O окислять значительную часть примесей;
- нерастворимости в жидкой меди части окислов, получающихся в результате окисления примесей;
- быстрого восстановления Cu_2O до Cu после удаления окисленных примесей;
- возможности удаления SO_2 , растворенного в жидкой меди, при перемешивании ее газообразными продуктами сухой перегонки древесины.

Окислительный процесс идет за счет кислорода воздуха, вдуваемого в расплав меди через несколько фурм (диаметр 12–19 мм при давлении воздуха 1–2,5 ат.), футерованных огнеупорной глиной. Основными реакциями при этом являются:



Высокая концентрация меди в расплаве способствует прохождению реакции (1), при этом параллельно с ней протекает реакция (2). Cu_2O растворяется в жидкой меди, что способствует непосредственному окислению примесей растворенным кислородом (3), и является окислителем для примесей по реакции (4).

Окисленные примеси (оксиды) в виде шлака удаляют с поверхности ванны, так как они могут восстановиться и вновь раствориться в металлической меди.

После удаления большей части примесей в расплаве меди содержится значительное количество кислорода, поэтому приступают к восстановлению Cu_2O (раскислению меди) и удалению растворенных газов по традиционной технологии.

Оптимизация и автоматизация окислительной стадии огневого рафинирования

В настоящее время физико-химические закономерности рафинирования меди изучены достаточно полно, но несмотря на это, существуют ряд проблем, которые в силу своей сложности и многогранности остаются актуальными [1–5].

Практика рафинирования показывает, что основным компонентом процесса является кислород в составе воздуха. Необходимая концентрация кислорода в расплаве определяется температурой расплава, концентрацией примесей и гидродинамикой продувки жидкой ванны.

С одной стороны, кислорода необходимо подавать с некоторым избытком для смещения равновесия реакций в прямом направлении, но это увеличивает продолжительность окисления и оказывает отрицательное влияние на механические, коррозионные и электрические свойства меди. С другой стороны, его недостаток снижает полноту перевода примесей в шлак.

Процесс централизованного рафинирования усложняется различным и переменным химическим составом шихты черновой меди от различных заводов.

В условиях повышенных требований к ресурсо- и энергосбережению возникает задача поиска оптимальных условий окисления меди с контролем параметров процесса.

Экспериментальное решение задачи по определению концентрации кислорода в расплаве меди сопряжено с рядом трудностей:

- сложность экспериментальных установок;
- низкие показатели электрохимической ячейки;
- значительное количество опытов;
- неоднозначность в определении зависимости между параметрами процесса.

Поэтому данную задачу целесообразно решать с использованием комбинированного подхода, включающего практическую составляющую и теоретические расчеты на основе аппарата математического моделирования с элементами автоматизации процесса.

Решение данной задачи можно условно разбить на несколько этапов:

- оптимизация состава шихты от заводов – продуцентов;

- расчет теоретически потребной концентрации кислорода в расплаве от массы, (τ) Cu_2O как целевой функции от массы примесей шихты черновой меди;
- разработка алгоритма автоматического контроля концентрации кислорода на этапе окисления примесей.

Оптимизационная задача успешно решена методами математического программирования, одним из которых является линейное программирование [6–14], суть которого заключается в составлении наилучшего плана, реализующего поиск значений переменных x_1, x_2, \dots, x_n , обращающих в максимум, либо минимум значение целевой функции:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n), \longrightarrow \min (\max), \quad (5)$$

представленной через систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

[illegible]

где a_{ij} – содержание j элемента в черновой меди от i -завода, %;

x_n — доля черновой меди в составе шихты от i -завода.

Величины значений ограничений (b_i) по каждой примеси в составе шихты можно рассчитать, например, как среднее арифметическое по каждой примеси от всех заводов.

Целевая функция определяет оптимальный состав шихты, удовлетворяющий условиям минимального содержания примесей в шихте:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \longrightarrow \min. \quad (7)$$

СЛАУ удобно решать в матричной форме с использованием прикладного пакета Microsoft Excel.

Зная разовую загрузку печи и используя значения долей черновой меди x_i , получаем оптимальный состав шихты с минимальным содержанием в ней примесей.

Результаты расчета использованы на втором этапе. Зная массу примесей в составе шихты и используя стехиометрические зависимости, последовательно рассчитаны:

- масса (т) Si_2O , необходимая для удаления всех примесей;
- необходимое значение теоретической массы кислорода;
- расчетное значение концентрации кислорода в расплаве для окисления примесей, % (по массе);
- количество воздуха в тоннах и м^3 , подаваемого в расплав.

Результатом второго этапа является методика оперативного расчета потребного количества кислорода, вводимого в расплав, обеспечивающего достаточно полное окисление и ошлакование примесей черновой меди, при наличии шихты переменного состава.

Используя базу данных о составах шихты и данную методику расчета, строится график зависимости концентрации кислорода (% по массе) в расплаве от массы, (т) Cu_2O , как целевой функции от массы примесей черновой меди.

Рассчитанное значение концентрации кислорода рекомендуется использовать при автоматически непрерывном или дискретном контроле на третьем этапе.

Контроль кислорода (воздуха), поступающего в расплав, позволяет в автоматическом режиме определить окончание его подачи.

Для очередного состава шихты рассчитывается теоретически потребное количество кислорода $[O_p]$ (воздуха). Подаваемое количество кислорода в расплав на этапе окисления примесей сравнивается с теоретически рассчитанным в непрерывном либо дискретном режиме (рисунок 1). При разнице $\Delta[O](t)$ равной 0 прекращается подача воздуха (кислорода) в расплав:

$$\Delta[\text{O}](t) = [\text{O}_p] - [\text{O}_{\text{TeK}}](t). \quad (8)$$

Для реализации данной задачи использован высокопроизводительный персональный компьютер и микроконтроллер, подготовлены специальные программы.

Количественные и качественные показатели процесса можно улучшить, используя инструментальные методы измерения кислорода в расплаве меди. В этом случае схема автоматизации немного усложнится.

На рисунке 1 представлен график отсечки кислорода (воздуха) при достижении расчетного значения, на рисунке 2 представлена функциональная схема автоматизации этапа окисления шихты черновой меди, а на рисунке 3 – схема алгоритма автоматизации.

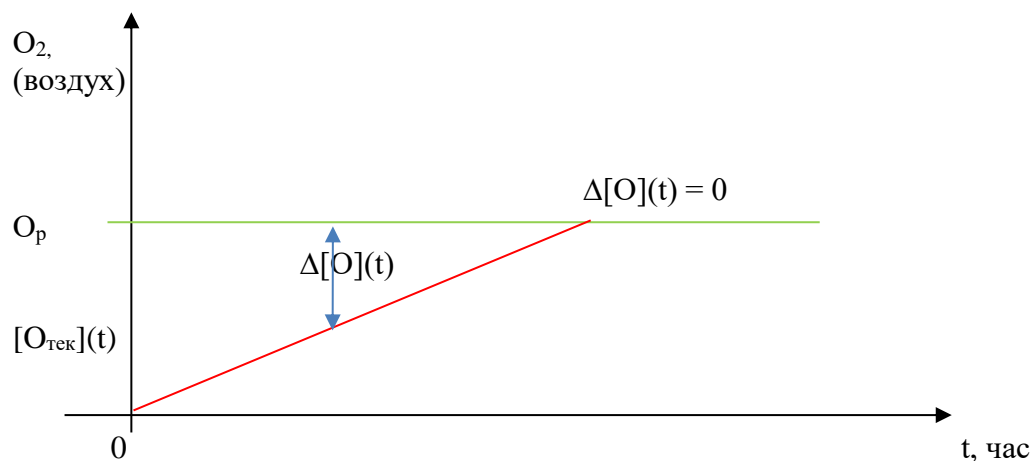


Рис. 1. График отсечки кислорода (воздуха)

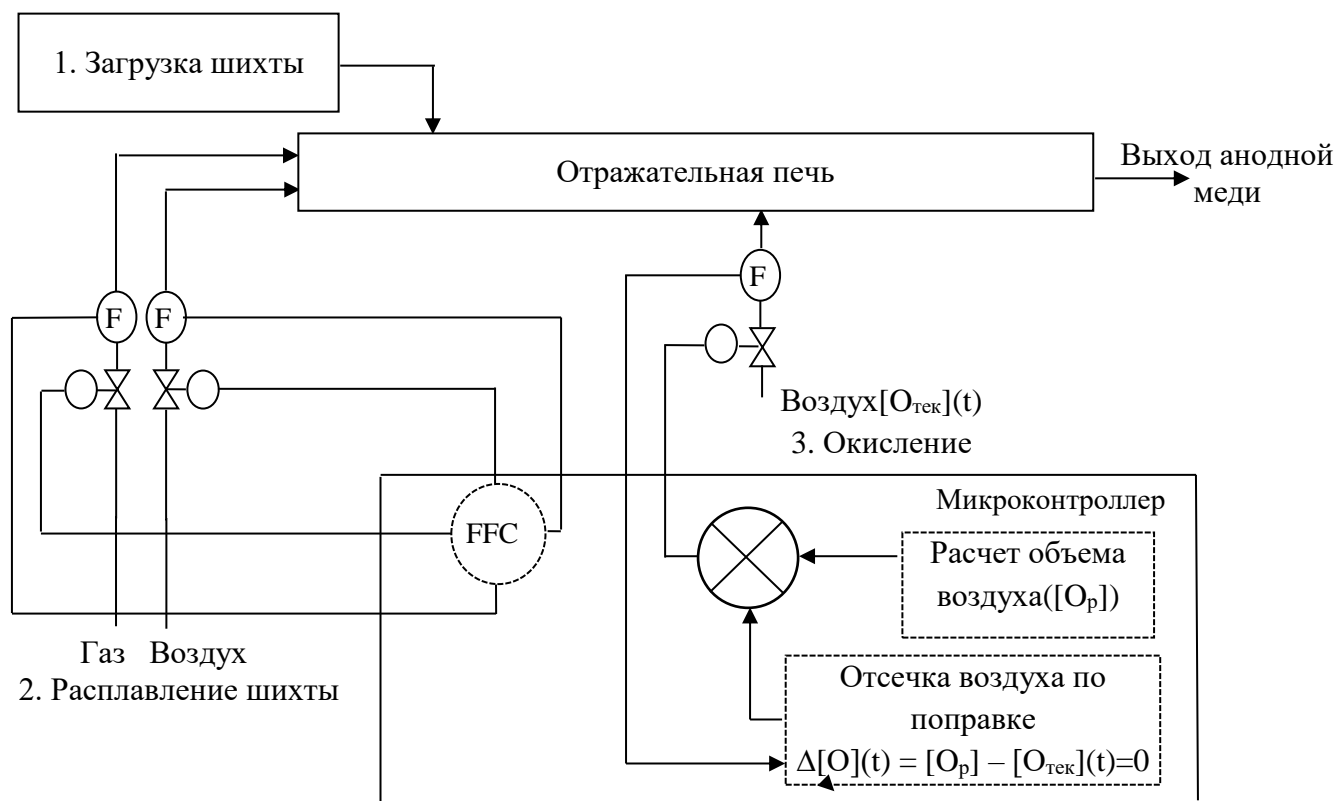


Рис. 2. Функциональная схема автоматизации окислительного этапа огневого рафинирования

Алгоритм начинается с ввода в базу данных химического состава и массы шихтовых материалов черновой меди, массы прочих компонентов, которые загружаются в печь.

Как указывалось выше, решение задачи предусматривает расчет оптимального состава шихты с минимальным количеством примесей. С этой целью в алгоритме предусмотрена процедура ветвления с двумя выходами – 2 «да/нет» (рисунок 3).

В случае положительного ответа элементы шихты обрабатываются процедурой «Расчет оптимальной шихты», при которой на основе, например, линейного программирования формируются новые элементы множества – шихта оптимальная.

В случае отрицательного ответа процедура «Расчет оптимальной шихты» для элементов шихты не выполняется.

Процедура «Расчет $[O_p]$ » реализована последовательным выполнением алгебраических операций, на основе констант – загрузка печи (t), молярные массы примесей, Cu_2O , O_2 . Первая операция предусматривает расчет массы Cu_2O , необходимой для удаления всех примесей. Расчет проводится с использованием уравнения стехиометрии по данным шихты. Полученное значение $[O_p]$ запоминается микроконтроллером.

Процедура «Расчет $\Delta[O] = [O_p] - [O_{тек}](t)$ » обеспечивает решение задачи сравнения текущего значения концентрации кислорода в расплаве с расчетными. При достижении нулевой разницы микроконтроллер выдает сигнал на прекращение подачи воздуха в расплав.

Заключение

В данной работе рассмотрены вопросы оптимизации и автоматизации окислительной стадии процесса огневого рафинирования черновой меди. Показана методика определения оптимальных параметров окисления на основе элементов математического моделирования и математической статистики. Показана возможность осуществления количественной оценки продолжительности окислительной стадии на основе элементов автоматизации.

Использование предложенной методологии позволяет оперативно рассчитывать необходимое количество кислорода, вводимого в расплав, обеспечивающего окисление примесей черновой меди различного состава.

Результаты работы согласуются с общей теорией огневого рафинирования и могут представлять интерес для практики анодной плавки.

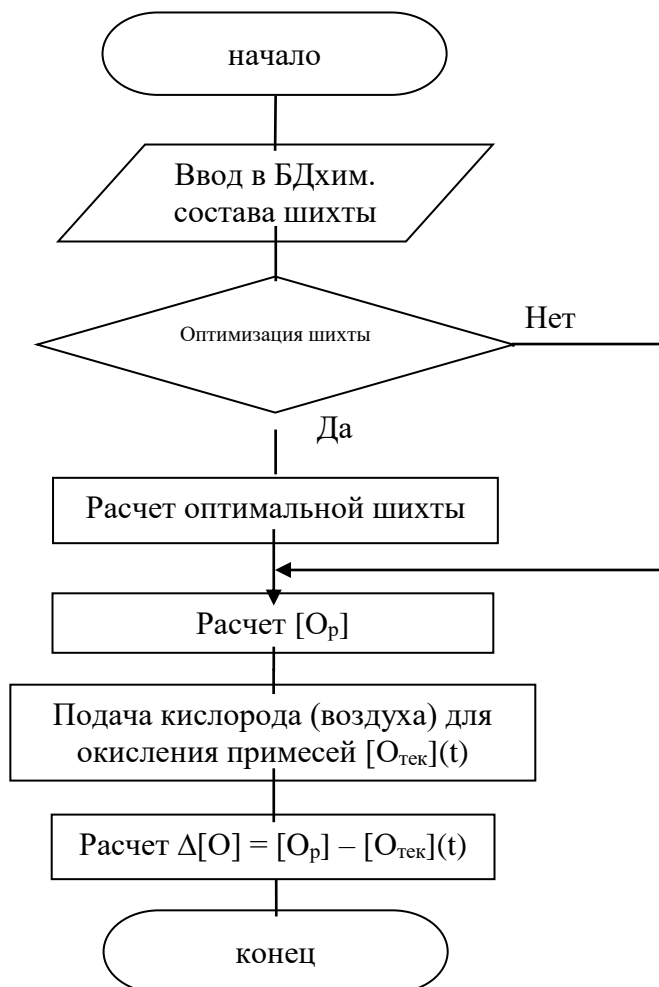


Рис. 3. Схема алгоритма автоматизации

Список использованных источников

1. Davenport W.G., King M., Schlesinger M., and Biswas A.K. Extractive metallurgy of copper, fourth edition. – Oxford: Elsevier Sci. Ltd., 2002. – 481 p.
2. Biswas A.K., Davenport W.G., King M., and Schlesinger M. Extractive metallurgy of copper. – Oxford. Pergamon, 1996. – 460 p.
3. Gerlach J., and Herfort P. The Rate of Oxygen Uptake by Molten Copper // Metal. 1968. 22 (11). P. 1068–1090.
4. Жуков В.П., Спитченко В.С., Новокрещенов С.А., Холод С.И. Рафинирование меди. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 317 с.
5. Жуков В.П., Скопов Г.В., Холод С.И. Пирометаллургия меди. – Екатеринбург: УрО РАН, 2016. – 632 с.
6. Агеев Н.Г. Моделирование процессов и объектов в металлургии. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. – 108 с.
7. Краснов М.П., Киселев А.И., Макаренко Г.И. и др. Вся высшая математика. Том 6. Вариационное исчисление, линейное программирование, вычислительная математика, теория сплайнов. – М.: Либроком, 2013. – 256 с.
2. Стренг Г. Линейная алгебра и ее применение. – М.: Мир. 1980. – 456 с.
3. Каханер Д., Моулер К., Нэш С. Численные методы и программное обеспечение. – М.: Мир. 1998. – 575 с.
4. Лунгу К.Н. Линейное программирование. Руководство к решению задач. – М.: Физматлит, 2005. – 128 с.
5. Лунгу К.Н., Норин В.П., Письменный Д.Т. Сборник задач по высшей математике. – М.: Айрис-пресс, 2011. – 592 с.
6. Vanderbei R.J. Linear Programming. Foundations and Extensions. – Berlin: Springer, 2007. – 464 p.
7. Venkata Rao R., Kalyankar V.D., and Waghmare G. Parameters optimization of selected casting processes using teaching-learning-based optimization algorithm // Applied Mathematical Modelling. 2014. Vol. 38, No. 23. P. 5592–5608.
8. Huijun F., Lingen Ch., Zhihui X., Zemin D., and Fengrui S. Eeneralized constructal optimization for solidification heat transfer process of slab continuous casting based on heat loss rate // Energy. 2014. Vol. 66. P. 991–998.

УДК 669.162.22–52

М. Ю. Ширшов¹, В. Г. Дружков¹, И. Е. Прохоров²

¹ ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия

² ПАО «Магнитогорский металлургический комбинат», г. Магнитогорск, Россия

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОИСКА ПУТЕЙ ПОВЫШЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГОРЯЧЕГО ДУТЯ ПО ФУРМАМ ДОМЕННЫХ ПЕЧЕЙ

Аннотация

Рассмотрены варианты подвода горячего дутья к «кольцевому» воздухопроводу, и геометрии фурменных приборов, как одна из причин неравномерного распределения дутья по фурмам доменных печей. Предложены рациональные сопряжения «прямого» воздухопровода с «кольцевым», а также рациональные сочетания конструкции узла подвода горячего дутья к «кольцевому» и вывода его из кольцевого воздухопровода в фурменные приборы, при реализации которых неравномерность распределения дутья будет минимальна.